

Dinámica fluvial en rifts invertidos a partir del parámetro χ : aplicación a la Cordillera Oriental de Colombia y a otras cordilleras de referencia

Fluvial dynamics on inverted rifts from the χ parameter: application to the Eastern Cordillera of Colombia and other reference mountain belts

Lucía Struth y Antonio Teixell

Departament de Geologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra (Barcelona), España.

Lucia.Struth@gmail.com, Antonio.Teixell@uab.es

ABSTRACT

The aim of this study lies in the extraction of the dynamic state of the drainage network in mountain belts that derive from rift inversion, such as the Eastern Cordillera of Colombia. This study demonstrates that, by applying a series of χ (chi) parameter calculations we can obtain initial information of the dynamic state of a river basin and predict the movement direction of the drainage divide and therefore the degree of expansion or reduction of a basin. The Eastern Cordillera of Colombia shows a drainage reorganization record from an initial longitudinal trend to a transversal domain, on the external and internal parts. The χ pattern is also shown for other inverted rifts as the High Atlas of Morocco and the Pyrenees, confirming that the pattern found is similar and that the χ geometry is a proxy for the degree of evolution of a mountain belt.

Key-words: Colombian Andes, drainage evolution, Chi parameter, drainage divide.

RESUMEN

El objetivo de este estudio recae en la evaluación del estado dinámico de la red de drenaje en rifts invertidos, como es la Cordillera Oriental de Colombia. El estudio demuestra que aplicando una serie de cálculos del parámetro χ (chi) se puede obtener una información inicial del estado dinámico de una cuenca fluvial y predecir la dirección de movimiento de las divisorias, y por lo tanto el grado de expansión o reducción de una cuenca hidrográfica. La Cordillera Oriental de Colombia muestra un registro de reorganización de la red de drenaje desde un inicio de dominio longitudinal a uno transversal, visible en las partes externas e internas. Se muestra el patrón χ en otros rifts invertidos como el Alto Atlas de Marruecos y los Pirineos, confirmando que el patrón encontrado en Colombia es similar y que la geometría χ evidencia diferentes grados de evolución de un orógeno.

Palabras clave: Andes de Colombia, evolución del drenaje, parámetro Chi, divisoria hidrográfica.

Geogaceta, 60 (2016), 55-58
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 2 de marzo de 2016
Revisión: 20 de abril de 2016
Aceptación: 20 de Mayo de 2016

Introducción

La topografía de la Tierra es el resultado de la compleja interacción entre procesos superficiales y profundos, los cuales dejan un registro en el paisaje cuantificable a partir de la morfometría del relieve local, del patrón de drenaje, de los perfiles longitudinales y la pendiente de los ríos, y de las relaciones pendiente-área (Kirby y Whipple, 2001; Wobus *et al.*, 2006; Perron y Royden 2013; Willett *et al.*, 2014). El sistema dinámico de la red de drenaje tiene como objetivo final alcanzar un estado de equilibrio, donde la erosión compense el levantamiento. Este estado se alcanza gracias a la propia dinámica de las cuencas hi-

drográficas, las cuales se ven influenciadas por cambios tectónicos, litológicos, climáticos y variaciones en el área de drenaje. Los cambios en el área de drenaje dentro de una cuenca se relacionan con los conceptos de captura fluvial, de migración de la divisoria de aguas y de aumento de las tasas de erosión (Yanites *et al.*, 2013), procesos que dejan huella en los perfiles de los ríos.

La Cordillera Oriental de los Andes de Colombia ofrece la oportunidad de estudiar el registro evolutivo de la red de drenaje de un orógeno en crecimiento, desde un *rift* inicial hasta la cadena montañosa actual, resultado de su inversión tectónica. El objetivo de esta contribución es doble: primero, evidenciar e

interpretar el estado dinámico de la red fluvial de la Cordillera Oriental mediante el análisis del cambio de área de drenaje en cada cuenca, cuyos resultados serán contrastados con datos morfométricos y geocronológicos y, segundo, comprobar si el patrón de reorganización fluvial deducido es solo aplicable a esa cordillera o si puede aplicarse de manera general a otros orógenos de similares características tectónicas, como son el Alto Atlas de Marruecos o los Pirineos.

Contexto geológico

El trabajo se centra en la Cordillera Oriental (Fig. 1), entre 6° N y 4° N, cadena



Fig. 1.- Localización de los ríos en la meseta axial (azul), flanco oriental (verde) y occidental (rosa) de la Cordillera Oriental de Colombia. Puntos de knickpoint por captura de la meseta en azul y por captura de valles longitudinales externos en rojo. LLB—Cuenca de los Llanos, MMVB—Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

Fig. 1.- Location of the rivers in the axial plateau (blue), eastern (green) and western (pink) flank of the Eastern Cordillera of Colombia. Plateau capture knickpoints are in blue and by capture of the external longitudinal valley in red. LLB—Llanos Basin, MMVB—Middle Magdalena Valley Basin.

montañosa que resulta de la inversión cenozoica de un *rift* continental de edad mesozoica. La Cordillera está compuesta por un zócalo precámbrico–paleozoico y una sucesión de rocas sedimentarias de edad Mesozoica–Cenozoica (Julivert, 1970; Colletta *et al.*, 1990), que se estructuran en un sistema de cabalgamientos y pliegues de doble vergencia cuyos flancos limitan al este y al oeste con las cuencas de los Llanos y del Magdalena Medio (a 200–300 m s.n.m.). Los flancos de la cordillera están dominados por ríos transversales cuyas divisorias de aguas de cabecera delimitan la parte interna del orógeno una meseta de bajo relieve dominada por ríos longitudinales (la Sabana de Bogotá, a 2500 m s.n.m.).

Los otros ejemplos analizados en comparación, el Alto Atlas y los Pirineos, resultan así mismo de la inversión tectónica de antiguos *rifts*, los cuales muestran similitudes y diferencias en cuanto a la red de drenaje: la Cordillera Oriental y el Alto Atlas muestra zonas internas con drenaje longitudinal y unos flancos con drenaje transversal (Babault *et al.*, 2013; Struth *et al.*, 2015), con poco acortamiento relativo en esas zonas internas. Los Pirineos presentan una mayor magnitud de acor-

tamiento orogénico, y su drenaje se muestra transversal en su totalidad (p.ej., Babault *et al.*, 2013).

Metodología

Las capturas fluviales tienen dos integrantes: la cuenca que gana área (agresora) y la que pierde (víctima). Cuando ocurre una captura, la red de drenaje conjunta entra en un estado de desequilibrio que se refleja en el parámetro χ , el cual es la función integral del área según la posición en la red de drenaje (Perron y Royden, 2013). Este parámetro se basa en la geometría actual de la red de drenaje y refleja el estado dinámico de las cuencas hidrográficas, y por lo tanto los cambios de área, como los que se producirían en una captura (Perron y Royden, 2013; Willett *et al.*, 2014). El parámetro χ se relaciona con la integral del área permitiendo la interpretación de cambios de área de drenaje en las cuencas. El interés principal del método consiste en resaltar las diferencias de valor χ en ambos lados de las divisorias. Valores similares en ambos lados de una divisoria sugieren que ésta permanece en equilibrio, mientras que una diferencia de valores implica una red de drenaje en desequilibrio, en la que para alcanzar el equilibrio se recurre a la migración de la divisoria o la captura fluvial (Willett *et al.*, 2014). Las divisorias migran hacia el lado de mayor χ con el objetivo de alcanzar el equilibrio, por lo que el lado de mayor χ tenderá a disminuir su área de drenaje mediante capturas (Willett *et al.*, 2014). Este análisis se realizó en los ríos representados en la figura 1, con una misma elevación de nivel de base determinado al pie de las estructuras tectónicas más externas. En esos ríos se calculó el valor χ a lo largo del curso y se mostró en mapa (χ -map) y en gráfica (χ -plot), siguiendo la metodología de Perron y Royden (2013) y Mudd *et al.* (2014). Para el caso del Alto Atlas y los Pirineos se calculó con nivel de base común, el mar. Giachetta y Willett (2015) reportaron el valor de χ para todos los sistemas fluviales de la Tierra.

Resultados y discusión

Valores elevados de χ en las cabeceras de los afluentes de la meseta axial se confrontan a valores menores en los flancos de la Cordillera (Fig. 2). Esta distribución se interpreta, de acuerdo con Struth *et al.* (2015)

como un movimiento migratorio de la divisoria de aguas hacia el centro del orógeno, de manera que las cuencas situadas en los flancos ganan área (agresoras) y las de la meseta la pierden (víctimas). Esta interpretación está siendo contrastada con tasas de erosión a nivel de cuenca a partir de isótopos cosmogénicos, que son del orden de 10 mm/ka para las cuencas de la Sabana y de 70 mm/ka para el flanco oriental. La diferencia de tasas de erosión favorece la migración de la divisoria hacia el dominio menos erosivo y los fenómenos de captura, que se evidencian, en los perfiles de los ríos agresores, mediante *knickpoints*. Este tipo de *knickpoint* marca el punto de encuentro entre el dominio inicial de flanco y el dominio de meseta capturado, tal y como se documenta en Struth *et al.* (2015).

El χ -map de la figura 2 muestra un retrato del estado actual del drenaje de la Cordillera Oriental, que se caracteriza por unos flancos agresores y una meseta víctima. Por otra parte, los χ -plots (Fig. 3) proporcionan información acerca de la tendencia evolutiva de los ríos en el tiempo, no únicamente sobre el estado actual.

Tal como revela la figura 3, el río Bogotá muestra una posición a la izquierda extrema (agresor) por su gran extensión capturada, mientras que los ríos de los flancos se sitúan por debajo (víctimas). Este resultado contrasta con la conclusión anterior de que los ríos de la Sabana de Bogotá eran las víctimas y los flancos eran los agresores. Ambos resultados son correctos pero para rangos de tiempo diferentes. El χ -map muestra el estado actual, describiendo una dominancia de los flancos sobre la Sabana. Por el contrario, los χ -plots al informar de la tendencia que seguirán los ríos con el

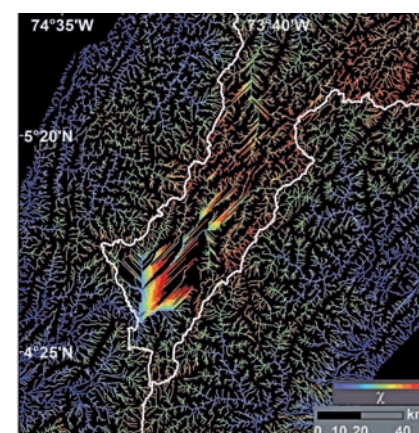


Fig. 2.- Mapa de valores χ para la zona de estudio en la Cordillera Oriental de Colombia.

Fig. 2.- χ -map for the area of study in the Eastern Cordillera of Colombia.

tiempo, muestra una meseta encaminada a alcanzar el estado de equilibrio (el cual se define como una función lineal entre área y elevación). En los flancos de la Cordillera los *knickpoints* de captura de la meseta (en azul, Fig. 3) están muy cerca de la divisoria, lo que indica que la incisión fluvial se ha propagado ya por la mayor parte de las cuencas y los ríos están cerca del equilibrio. En contraste, el río Bogotá presenta el *knickpoint* de captura muy alejado de su nacimiento, que para alcanzar el equilibrio deberá migrar aguas arriba, proporcionando a su vez más fuerza y potencial a sus afluentes en la Sabana.

Tal y como se aprecia en la figura 3A, los χ -plot muestran una serie de pequeñas inflexiones a bajas elevaciones, las cuales derivan del paso del río transversal a través de antiguos valles longitudinales y por lo tanto reflejan antiguas capturas.

A partir de estas observaciones se puede definir un modelo evolutivo compatible con el propuesto por Babault *et al.* (2013), en el que inicialmente había un drenaje longitudinal siguiendo las estructuras tectónicas, y con el levantamiento progresivo de la Cordillera los valles longitudinales en las zonas externas fueron capturados por ríos trasversales, los

cuales eran y son afluentes del río Magdalena al W y del río Meta al E. La zona de la meseta axial preserva los antiguos valles longitudinales más internos, cuya área de drenaje conecta actualmente con un afluente transversal del Magdalena. Esta conexión es producto de captura fluvial mediante el mismo patrón de captura y reorganización de drenaje de longitudinal a transversal. Los diagramas χ -plot y el contraste que hemos obtenido preliminarmente en tasas de erosión indican que hay un gran desequilibrio fluvial en la Cordillera Oriental, definiendo un bajo grado de madurez orogénica. La maduración a través del tiempo y el reajuste de los ríos para alcanzar el equilibrio tenderá a igualar los valores χ a cada lado de la divisoria y mostrará χ -plots con una geometría más lineal.

A partir de este análisis es interesante comprobar si las evidencias que definen el patrón de drenaje deducido a partir del parámetro χ y la distribución de las inflexiones en los χ -plots son únicos para la Cordillera Oriental o si se muestran también en los demás orógenos antes mencionados. La figura 4 resume el χ -map y el χ -plot calculados para el Alto Atlas y los Pirineos. El Alto Atlas no muestra meseta limitada por dos di-

visorias principales como la Cordillera Oriental, sino que presenta una sola divisoria con valores χ mayores en el flanco Sur, definiendo una migración general de la divisoria en esta dirección. Tal y como se deduce de la figura 4A, este contraste no se debe a una diferencia dinámica y topográfica en cada dominio fluvial como en Colombia, sino a la diferencia de recorrido de los ríos para cada cuenca, siendo mucho mayor al Sur (como predice la ecuación 3 en Willett *et al.*, 2014).

En el caso de los Pirineos, se observan similares valores de χ en la parte central y oriental de la cadena, con lo que los ríos están alcanzando un estado de equilibrio y la divisoria no migrará significativamente. Al W, donde las cuencas septentrionales desembocan en el Cantábrico, la diferencia a través de la divisoria es notoria: debido al contraste de recorrido de los ríos (menor para el flanco norte), éstos ejercen una mayor erosión que los del sur y por lo tanto, la divisoria migrará hacia el sur.

Con los resultados obtenidos con los χ -plots y los χ -maps se manifiestan los estados diferentes de maduración de un orógeno a través de la dinámica fluvial. En un primer estadio orogénico de baja madurez en la inversión de un *rift*, se conserva la parte interna con valles longitudinales y dos divisorias, y los flancos amenazan a la meseta de ser capturada (Fig. 2). Este primer estadio se define por el fuerte contraste de valores χ entre los flancos y la meseta y por un χ -plot cuyos perfiles se dividen en dos tendencias, la de la meseta con una gran inflexión en altitud a la izquierda del gráfico y la de los ríos de los flancos, que se ubicarán por debajo y a la derecha del primero. Se muestra también un conjunto de inflexiones en la parte inferior del gráfico que corresponderán a las capturas de antiguos valles longitudinales limitados por estructuras tectónicas. Seguidamente, a medida que el drenaje evolucione y tienda a reequilibrarse, irá desapareciendo el área de meseta, aumentando la de los flancos con sus ríos trasversales gracias a los procesos de captura. De esta manera irán desapareciendo los valles longitudinales de la parte interna. El Alto Atlas de Marruecos es un ejemplo de este estadio de maduración, en el cual se preservan unos pocos valles longitudinales relictos de la topografía inicial (Babault *et al.*, 2012). Así mismo, y siguiendo el patrón descrito para la Cordillera Oriental, se observa un χ -map (Fig. 4A) con contraste a ambos lados de la divisoria, pero sin llegar a obtener un χ -plot tan diferente como en Colombia, ya que no está

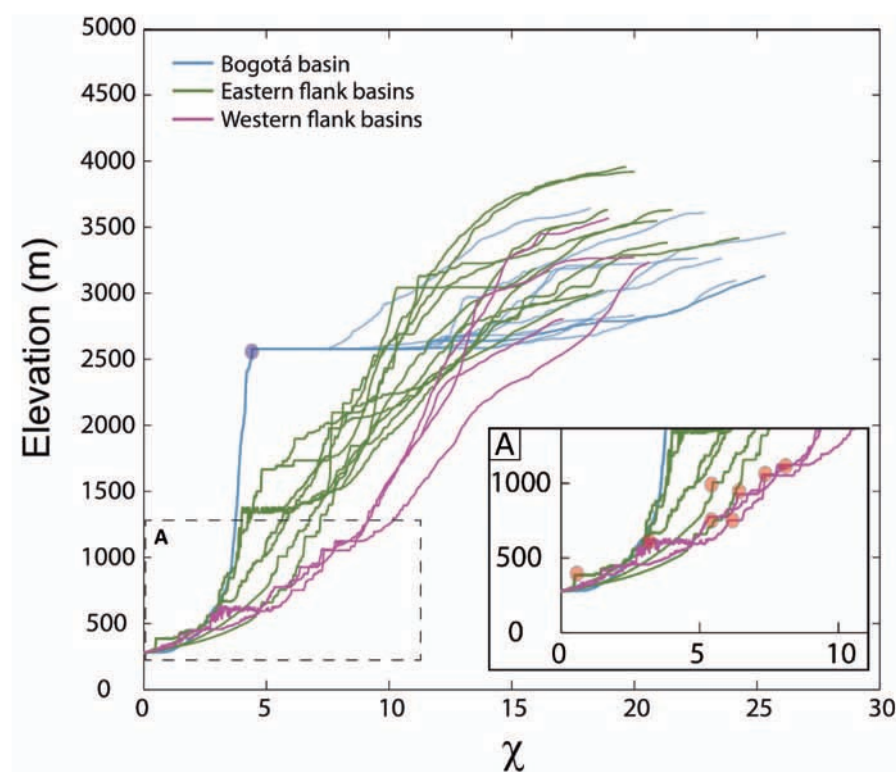


Fig. 3.- χ -plot de los ríos que discurren por la Sabana de Bogotá (azul) y los pertenecientes al flanco oriental (verde) y occidental (rosa). Inflexiones por captura del meseta en azul y por captura de valles longitudinales externos en rojo.

Fig. 3.- χ -plot of rivers flowing through the Sabana de Bogotá (blue), eastern (green) and western flank (pink). Plateau capture knickpoints are in blue and by capture of the external longitudinal valley in red.

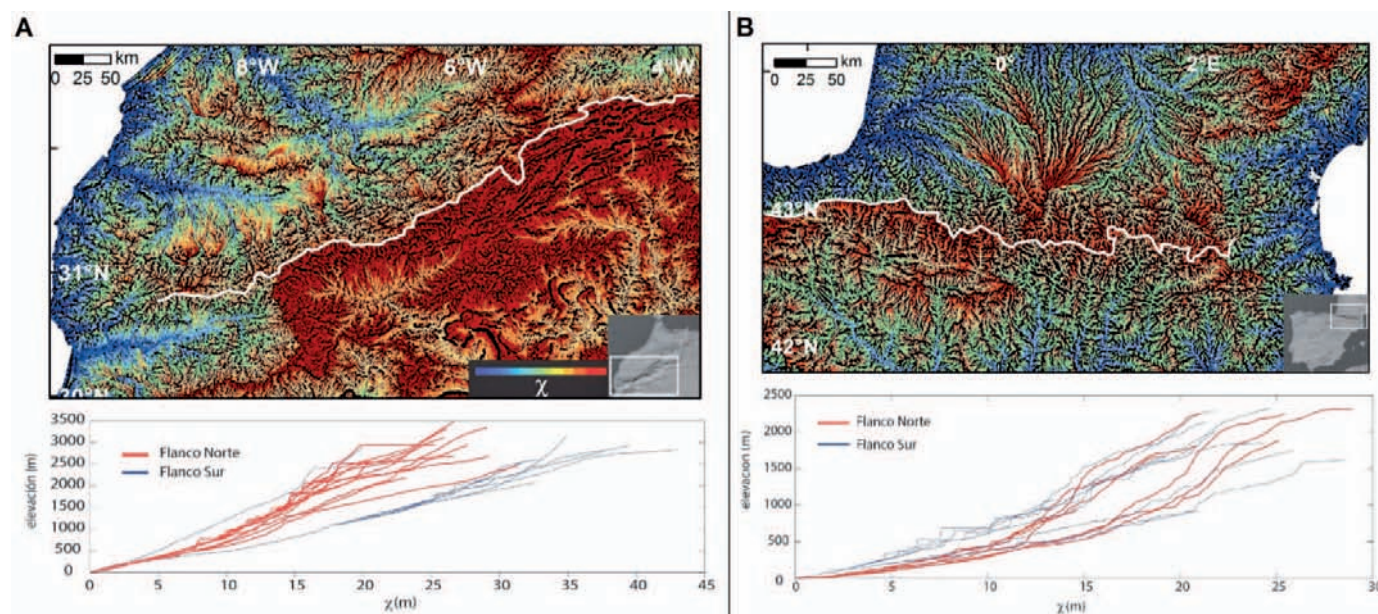


Fig. 4.- Mapa de valores χ y χ -plot para el Alto Atlas de Marruecos (A) y los Pirineos (B). La línea blanca representa la divisoria de aguas.

Fig. 4.- χ -map and χ -plots for the High Atlas of Morocco (A) and for the Pyrenees (B). The white line represent the drainage divide.

conservada la parte interna y no se ve la inflexión de captura de la meseta con un χ tan bajo. La figura 4A refleja, además, un conjunto de inflexiones, a baja cota, relacionadas con antiguos valles longitudinales, ahora capturados.

Si el orógeno sigue creciendo cada vez adquirirá condiciones de mayor equilibrio de la topografía y de la red de drenaje. Los valores de χ irán igualándose y no habrá relictos del drenaje longitudinal inicial. Solo quedarán las inflexiones inferiores relacionadas con las estructuras, definiendo un patrón evolutivo de longitudinal a transversal. Este estado avanzado de madurez es el que se observa en los Pirineos (Fig. 4B).

Conclusiones

A través del análisis del parámetro χ que describe el estado de equilibrio de la red fluvial, se confirma que la Cordillera Oriental de Colombia sigue un patrón evolutivo desde un estadio inicial dominado por drenaje longitudinal a un estadio posterior dominado por drenaje transversal. La reorganización se define como el resultado de procesos de captura favorecidos por el propio crecimiento de la Cordillera, y refleja su estado de madurez orogénica. Este trabajo demuestra que el patrón descrito para la Cordillera es aplicable a otros orógenos de inversión como el Alto Atlas de Marruecos y los Pirineos, definiendo tres estados de maduración diferentes en

dicho patrón evolutivo, los cuales se reflejan bien en el parámetro χ .

Este análisis, acompañado de otros datos cuantitativos de tipo geocronológico o sedimentológico, constituye una herramienta muy valiosa para describir y conocer la dinámica de las redes fluviales y de sus divisorias de aguas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2010-15416 y CGL2014-54180-P. Se agradece a los revisores D. García Castellanos y J. M. Azañón, cuyos comentarios han ayudado a mejorar este trabajo.

Referencias

- Babault, J., Van den Driessche, J. y Teixell, A. (2012). *Tectonics* 31, doi: 10.1029/2011TC003105.
- Babault, J., Teixell, A., Struth, L., Van den Driessche, J., Arboleya, M. y Tesón, E. (2013). En: *Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion* (M. Nemcock, A. Mora, y J.W. Cosgrove, Eds.). *Geological Society, London, Special Publications* 377, 141–158.
- Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P. y Rudkiewicz, J.-R. (1990). En: *Petroleum and Tectonics in Mobile Belts* (J.

Letouzey, Ed.), Editions Technip, Paris, 81–100.

- Giachetta, E. y Willett, S. (2015). En: *American Geophysical Union 2015 Fall Meeting*, San Francisco. *Abstract* 67114. *Poster disponible en:* <https://www.researchgate.net/publication/289534247>.
- Julivert, M. (1970). *Geological Society of America Bulletin* 81, 3623–3646.
- Kirby, E. y Whipple, K. (2001). *Geology* 6, 415–418.
- Mudd, S.M., Attal, M., Milodowski, D.T., Grieve, S.W.D. y Valters, D.A. (2014). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 119, 138–152.
- Perron, J.T. y Royden, L. (2013). *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 570–576.
- Struth, L., Babault, J. y Teixell, A. (2015). *Geomorphology* 250, 370–383.
- Willett, S.D., McCoy, S.W., Perron, J.T., Goren, L. y Chen, C.-Y. (2014). *Science* 343, 1248765. doi: 10.1126/science.1248765.
- Wobus, C., Whipple, K.X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropoulou, K., Crosby, B. y Sheehan, D. (2006). En: *Tectonics, Climate and Landscape evolution* (S.D. Willett, N. Hovius, M.T. Brandon y D.M. Fisher, Eds.). *Geological Society of America Special Paper* 398, 55–74.
- Yanites, B.J., Ehlers, T.A., Becker, J.E., Schnellman M. y Heuberger S. (2013). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118, 1060–1084.